

IDONEIDAD DE LA ILUMINACIÓN CON LED Y OLED DE ESTADO SÓLIDO PARA EL CULTIVO DEL AZAFRÁN (*CROCCUS SATIVUS* L.) EN INVERNADEROS

LUIS M. NAVAS¹, MARIANELA CASTRO², JOSÉ M. DURÁN², PABLO MARTÍN¹,
JESÚS MARTÍN¹

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid (UVA), Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Avda. Madrid, 44, 34004-Palencia (ESPAÑA). Tel: +34 979 108 360. E-mail: lmnnavas@iaf.uva.es.

² Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia, Ciudad Universitaria, s/n, 28040-Madrid (ESPAÑA). Tel: +915 491 312. E-mail: josem.duran @ upm.es.

Apresentado no

IX Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010
XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2010
25 a 29 de julho de 2010 - Vitória - ES, Brasil

RESUMEN: Cormos de azafrán (*Crocus sativus* L.) fueron analizados morfológicamente y se cultivaron de forma hidropónica a 16 - 21 °C. Con el fin de estudiar el efecto de la radiación electromagnética de color azul (435 nm), roja (660 nm) y del rojo lejano (730 nm) sobre la fotosíntesis y la morfogénesis del azafrán, se utilizaron diodos emisores de luz (LED) fabricados por PHILIPS (mod. *GreenPower LED High Flux*). La intensidad de iluminación que recibió el cultivo se ajustó a la que recibiría en condiciones naturales mediante un sistema electrónico de control, en el que se utilizan *dimmers* para el control del flujo luminoso. Los resultados obtenidos hasta este momento permiten señalar que, tanto la iluminación con luz azul y roja estimulan de forma significativa el crecimiento de los vástagos (parte aérea) frente a los cormos testigo (iluminación natural), si bien en ninguno de los tratamientos se ha producido la inducción floral que cabía esperar. Como una alternativa viable a los tradicionales LEDs inorgánicos, algunos de los nuevos experimentos utilizarán diodos orgánicos emisores de luz (OLED), basados en nuevos complejos de erbio octocoordinados y con emisiones en las regiones del rojo y del infrarrojo cercano.

PALABRAS CLAVE: Diodos emisores de luz (LEDs), diodos emisores de luz orgánicos (OLEDs), irradiación de plantas.

SUITABILITY OF LED- AND OLED-BASED SOLID STATE ILLUMINATION FOR THE CULTIVATION OF SAFFRON (*CROCCUS SATIVUS* L.) IN GREENHOUSES

ABSTRACT: Grown in Albacete (Spain) in 2009, saffron corms (*Crocus sativus* L.) were morphologically analyzed and cultivated using hydroponic methods at 16-21°C, with a re-circulated nutritious solution renovated every fifteen days. In order to study the effects of blue- (435 nm), red- (660 nm) and NIR- (730 nm) electromagnetic radiation on the photosynthesis and morphogenesis of saffron, Light-Emitting Diodes (LEDs) panels manufactured by Philips (*GreenPower LED High Flux* model) were used. The light intensity that the crop received was adjusted to simulate light intensity received in natural conditions by means of an electronic control system, in which dimmers were used so as to control the luminous flux. Results obtained to date indicate that both blue and red emission significantly stimulate the shoots' (aerial parts) growth in comparison to control corms (under natural

illumination). The expected floral induction has not taken place in any of the treatments which suggests that new experiments need to be conducted. As a feasible alternative to traditional inorganic LEDs, several of these new experiments will utilize organic light-emitting diodes (OLEDs) based on novel erbium octocoordinated complexes with emission in the red and near infrared regions.

KEYWORDS: Light-Emitting Diode (LED), Organic Light-Emitting Diode (OLED), plant irradiation.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en España el cultivo de azafrán (*Crocus sativus* L.) es tradicional y familiar, escasamente mecanizado que requiere gran cantidad de mano de obra (PÉREZ BUENO, 1995). Se trata de un cultivo marginal con un futuro incierto, en el que la aplicación de nuevas tecnologías puede hacer posible la introducción del azafrán en invernadero e incluso puede facilitar la introducción del cultivo en el propio domicilio familiar del consumidor. Respecto a la situación del sector productivo, en los últimos años su producción ha descendido a causa del aumento del nivel de vida y el encarecimiento de la mano de obra. Sin embargo, el descenso de producción no ha tenido consecuencias sobre el control del mercado mundial del azafrán, que sigue estando en manos de empresas europeas que conocen a la perfección como elaborar el azafrán con los mejores resultados. El sector se encuentra muy fragmentado, en manos de pequeñas y medianas empresas que controlan entre el 80% y el 90% del mercado mundial, donde existe una gran competencia (INTERREG III, 2006).

El presente trabajo analiza el comportamiento del azafrán cultivado en un medio hidropónico, utilizando la irradiación artificial procedente de LEDs como fuente de excitación fotosintética y morfogénica. Así, gracias a las técnicas hidropónicas se pueden cubrir fácilmente todas las necesidades del azafrán por medio de una disolución nutritiva recirculante (DNR), sin tener que preocuparse por el tipo del sustrato disponible y sin problemas de irrigación o drenaje, entre otros. Modificando la composición química de la DNR se puede influir en el desarrollo del cultivo, tratando de promover o estimular la fase vegetativa o reproductiva. Por otro lado, utilizando la irradiación artificial roja o azul, según los diferentes periodos de desarrollo de la planta, se trata de incrementar el rendimiento del cultivo con el fin de lograr varias cosechas a lo largo del año.

En la actualidad existen pocos estudios basados en la utilización de LEDs en agricultura, y no se ha realizado ningún estudio en el cultivo del azafrán. La luz azul (400-500 nm) tiene un efecto inhibitorio sobre el crecimiento de las plantas, por lo que puede ser usada como una alternativa a los productos químicos que retardan el crecimiento vegetal en altura. El uso de la luz azul para inhibir la elongación de las plantas ha sido previamente documentado con estudios en crisantemos (OYAERT *et al.*, 1999, KIM *et al.*, 2004, SHIMIZU *et al.*, 2006, OKAMOTO *et al.*, 1997). Así, la luz azul es una estrategia potencial para los productores para producir plantas con un crecimiento más compacto. Por otro lado, una interrupción de la noche se presta a menudo a plantas de día corto, para inhibir la floración. Pero estas interrupciones no son suficientes para regular la floración en todas las especies (SHIMIZU *et al.*, 2006, OKAMOTO *et al.*, 1997). Diversos estudios han demostrado que la luz azul es necesaria para la producción en semillero de lechugas (HOENECKE *et al.*, 1992). También se han realizado estudios comparando las lámparas normalmente utilizadas para cultivos hortícolas (lámparas de descarga en vapor de sodio a alta presión) y los LEDs. Algunos de estos ensayos han demostrado que utilizar LEDs y utilizar lámparas de xenón dan lugar a la misma respuesta fotosintética en las plantas de *Pueraria lobata* (TENNENSSSEN *et al.*, 1994). Los LEDs también se han aplicado en ensayos con fresas, demostrando que utilizándolos se favorece la micropropagación de las plántulas. Además, se facilita la

aclimatación de los cultivos in vitro contribuyendo al crecimiento de las plántulas (NHUT *et al.*, 2000).

Por su parte, los diodos orgánicos emisores de luz (OLED) han sido desarrollados ampliamente para pantallas planas, pero sólo en los últimos meses se ha demostrado que la eficiencia de los OLEDs blancos (WOLEDs) han alcanzado unas cotas que permiten considerarlos aptos para aplicaciones de iluminación de estado sólido (SSL, *solid-state lighting*), ya sea para uso general o para la irradiación de plantas en invernaderos. En el año 2009 se presentaron OLEDs con una eficiencia superior a los 150 lm/W y una vida útil proyectada para 100.000 h. Esta alta eficiencia, que duplica la de una lámpara fluorescente, se debe al hecho de que la luz OLED se genera por el decaimiento radiactivo de excitones con muy poco calor asociado, mientras que las tecnologías de iluminación convencional precisan rutas energéticas de altas temperaturas o bien plasma para generar luz como un subproducto del proceso de excitación primaria.

En cuanto a los requisitos de SSL, es necesario destacar el hecho de que el color, la eficiencia y los gastos difieren en función de las pantallas. Considerando que una pantalla excelente se puede construir empleando tres emisores monocromáticos, una fuente de luz debe dar todos los colores que ilumina. Esto requiere un espectro amplio similar al emitido por un cuerpo negro que cubra todo el espectro visible. Esta capacidad de proporcionar todos los colores se mide a través del CRI (*color rendering index*). Se precisan fuentes con CRI superiores a 70 para ser aplicable en la iluminación de interiores y que proporcionen una iluminación mayor que 5.000 lm, es decir, que sea capaz de sustituir a cuatro lámparas fluorescentes con un difusor de una oficina estándar. Además, la temperatura de color correlada, (CCT) para una lámpara incandescente debe ser aproximadamente de 2.700 K, lo que se conoce como "un blanco frío". Con base en datos de laboratorio de hoy en día, los SSL orgánicos pueden lograr una calidad de iluminación suficiente para iluminación general. El objetivo más desafiante es que fuera asequible económicamente. Un coste razonable para un panel OLED podría ser de unos 10 US\$, lo cual se puede lograr por medio de procesos rápidos de deposición en continuo, tales como las técnicas *roll to roll*.

Desde el punto de vista del mercado, varias compañías están trabajando con productos de luz WOLED. Según una nueva investigación de Cintelliq, más de 1.800 patentes de WOLED se han referido en abril de 2010. Philips ya proporciona muestras de paneles OLED, con paneles "comerciales" disponibles en 2010. OSRAM proporciona su primer panel OLED, el ORBEOS. En Japón, Lumiotec ha comenzado a enviar sus propios kits de iluminación OLED en febrero de 2010. GE espera obtener productos durante el 2010 y Visionox de China han mostrado prototipos decorativos de iluminación OLED. Otras compañías involucradas en la iluminación de WOLED son Konica Minolta (espera contar con productos para el 2011), Universal Display, ModisTech y Pioneer (en colaboración con Mitsubishi). Samsung también está trabajando con iluminación OLED, y LG Chem se ha unido a la carrera y quiere comenzar la producción en masa en 2010.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los ensayos se llevaron a cabo en una sala climatizada (temperatura ambiente controlada entre 16 y 21 °C), habilitada en el Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid (España). Los cormos de azafrán utilizados fueron facilitados por el Instituto Técnico Agropecuario de Albacete (ITAP), a mediados de Junio del 2009. El lote recibido fue separado en tres clases según su peso y tamaño. Los cormos, tras ser tratados preventivamente con Captan y Previcur®, se plantaron recién germinados en noviembre, seleccionando aquellos en los que la germinación era menos pronunciada.

El sistema de cultivo hidropónico donde se realizaron los experimentos se montó dentro

de una estructura de aluminio, según se muestra en la Figura 1. Para evitar que la luz del exterior influenciara en el ensayo, se colocó una tela aluminizada envolviendo la estructura. El medio hidropónico de cultivo elegido fue el sistema NGS[®] (Figura 2), constituido por una mesa inclinada de 71 cm de alto, 163 cm de largo y 74 cm de ancho, en la que están acopladas cinco líneas de cultivo, cada línea formada por una bolsa con varias láminas de polietileno que tienen una serie de orificios donde se colocan los cormos de azafrán. Por cada bolsa circula la DNR (concentración de 2,5 mm/L de sales), aplicada mediante un gotero situado en los orificios en donde se localizan los cormos, alimentándose desde un depósito gracias a una bomba accionada mediante un control temporizado cíclico (ciclos de riego de 15 min cada 75 min). La pendiente de la mesa ayuda a que la DNR llegue a todo el cultivo y permite que la solución no absorbida regrese al depósito. La mesa de ensayo fue dividida en dos secciones para poder llevar a cabo diferentes estudios con las mismas condiciones de temperatura.

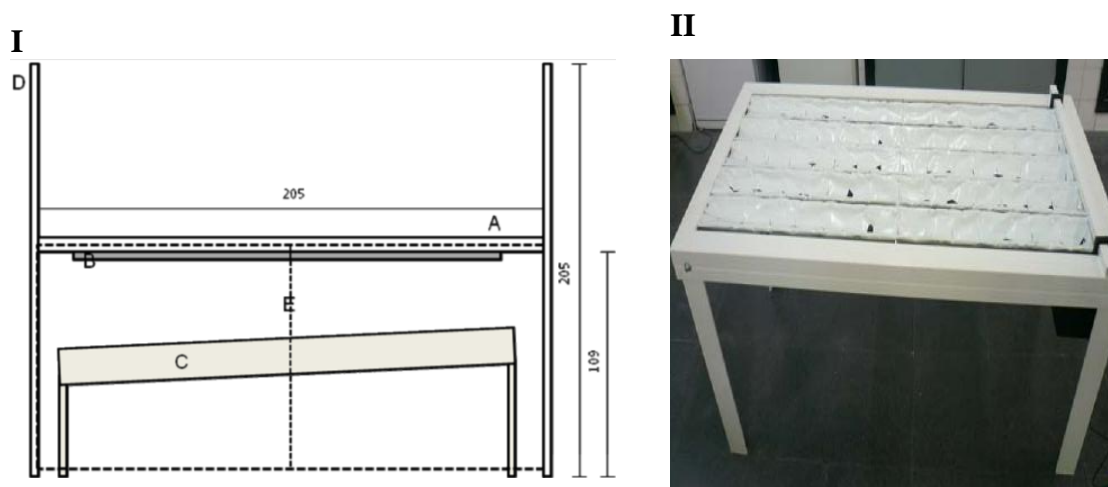


FIGURA 1. I: Esquema del dispositivo experimental (A, PVC porta LEDs; B, LEDs; C, mesa de cultivo hidropónico; D: Estructura móvil de aluminio y E, Cortina aluminizada. Cotas en cm). II: Imagen de la mesa de cultivo hidropónico empleada en los ensayos.

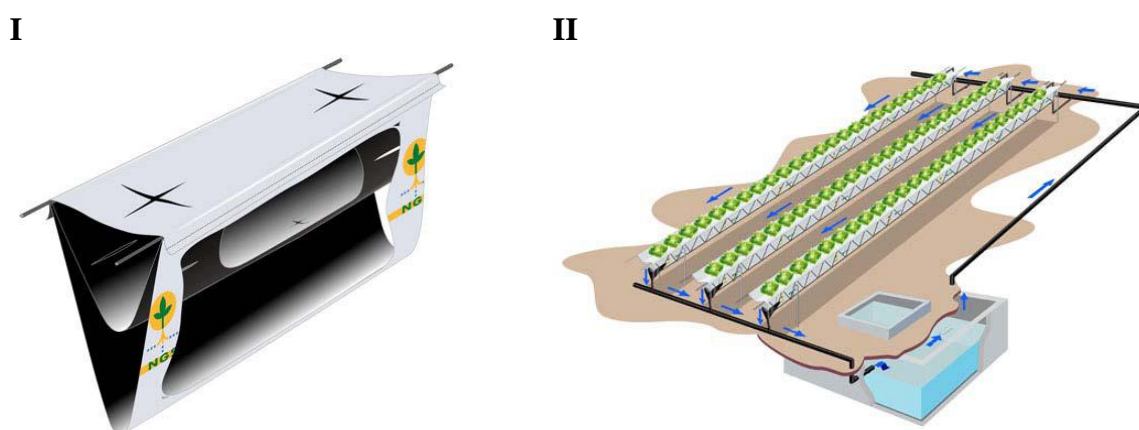


FIGURA 2. I: Bolsa de cultivo NGS[®] de tres capas empleada en los experimentos. La lámina superior sostiene el cultivo. El gotero va instalado en la capa central, por donde la solución nutritiva entra en contacto directamente con la raíz. La última lámina retiene los excesos del riego y las raíces con mayor crecimiento. II: Esquema de la instalación del sistema recirculante NGS[®] utilizado.

Por su parte, para realizar los experimentos se utilizaron veinticuatro módulos GreenPower LEDs de la marca PHILIPS, modelo High-Flux[®], separadas en dos grupos para generar dos ambientes diferentes (Figura 3). En total se utilizaron dos LEDs azules, dos LEDs de rojo lejano y ocho LEDs de rojo cercano por sección, alimentados a 24 Vcc mediante fuentes de alimentación, regulados con *dimmers* y controlados mediante un controlador lógico programable desde el que se puede seleccionar el modo de operación de la instalación (manual y automático), los circuitos con los que se desea actuar y, en el modo de operación automático, el horario y el calendario de funcionamiento de cada circuito de LEDs (dentro del horario/calendario de operación, se establecen ciclos asimétricos de funcionamiento, definiendo un tiempo de activación y otro de desactivación de los ciclos).

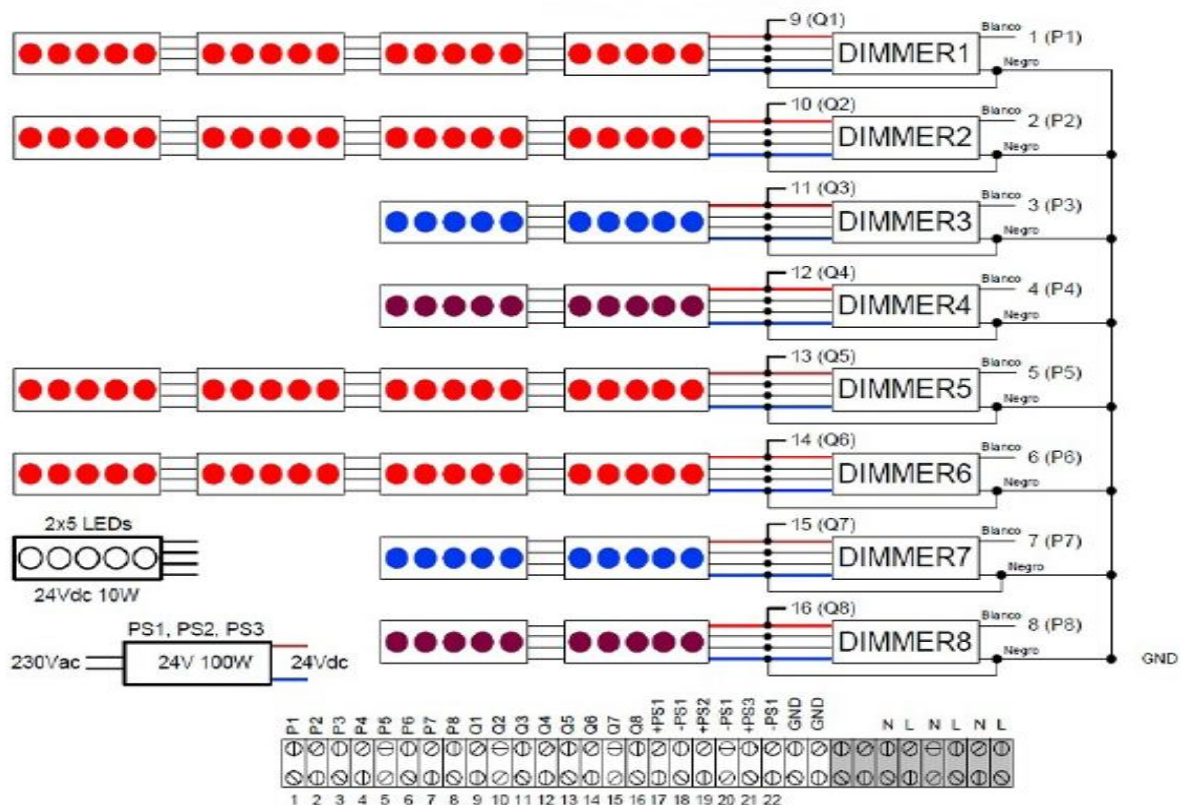


FIGURA 3. Esquema de conexión de los módulos LEDs empleados en los ensayos.

La distribución espectral de la luz solar y de los LEDs empleados fue medida mediante un espectrorradiómetro LI-COR 1800. A partir de estas mediciones se determinaron los ensayos a realizar. La distribución espectral de la luz solar se determinó a diferentes horas del día, mientras que la de la luz emitida por los LEDs se realizó a tres alturas diferentes de los LEDs sobre las líneas de cultivo (10, 20 y 30 cm), puntos en los que se situó el espectrorradiómetro. Se realizaron mediciones de cada línea de cultivo, puesto que al colocar los LEDs en distintas hileras de color cada línea recibía diferente radiación.

En el presente trabajo se realizaron dos ensayos diferentes variando la distribución espectral de la luz irradiada a los cormos de azafrán y un ensayo control (Figura 4):

- Ensayo 1: Irradiación con un espectro fundamentalmente en el rojo cercano.
- Ensayo 2: Irradiación con un espectro fundamentalmente en el azul.
- Ensayo de control: Con radiación solar.

I**II**

FIGURA 4. Ensayos de irradiación realizados con LEDs para el cultivo hidropónico de azafrán (*Crocus sativus* L.): I, Ensayo de irradiación con un espectro fundamentalmente en el rojo cercano; II, Ensayo de irradiación con un espectro fundamentalmente en el azul.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se muestran conjuntamente las curvas de distribución espectral de la radiación solar, medidas a cuatro horas del día, y de los LEDs, medidas a tres alturas de separación de las líneas de cultivo. Tras comparar los espectros y tomando como referencia la luz solar del mediodía (hora local), se observó que la distancia más adecuada para colocar los módulos LEDs del cultivo era de 25 cm. Se aplicaron once horas de luz diaria comenzando a las 7:30 h de la mañana y finalizando a las 17:30 h de la tarde.

Durante el transcurso del ensayo se recogieron datos semanales del crecimiento tanto de la longitud como de la masa de los cormos de azafrán. Estos datos están reflejados en las Figuras 6 y 7. En cuanto al crecimiento en altura los cormos del Ensayo 2 presentaron mayor crecimiento, seguidos por los cormos del Ensayo 1 y por último los cormos del Ensayo control. En cambio, cuando comparamos la cantidad de masa acumulada en el período en que transcurrió el ensayo, observamos que el Ensayo 1 mantuvo un crecimiento bastante estable, mientras que el Ensayo 2 y el Ensayo control presentaron variaciones durante todo el periodo, siendo las del Ensayo control mucho más significativas.

Para comprender más los datos obtenidos se realizó un análisis factorial y un análisis de varianza, en los que se evalúa semanalmente la relación que hay entre la luz y la línea de cultivo con respecto al crecimiento de los cormos. Los datos estadísticos se analizaron mediante la aplicación SYSTAT 10. Al realizar el análisis factorial semanal se observa como no hay significación alguna entre la radiación, la línea de cultivo y entre la interacción línea de cultivo x radiación, para el peso obtenido semanalmente por el azafrán. En cambio, estos factores sí que afectan notablemente al crecimiento en altura de los cormos.

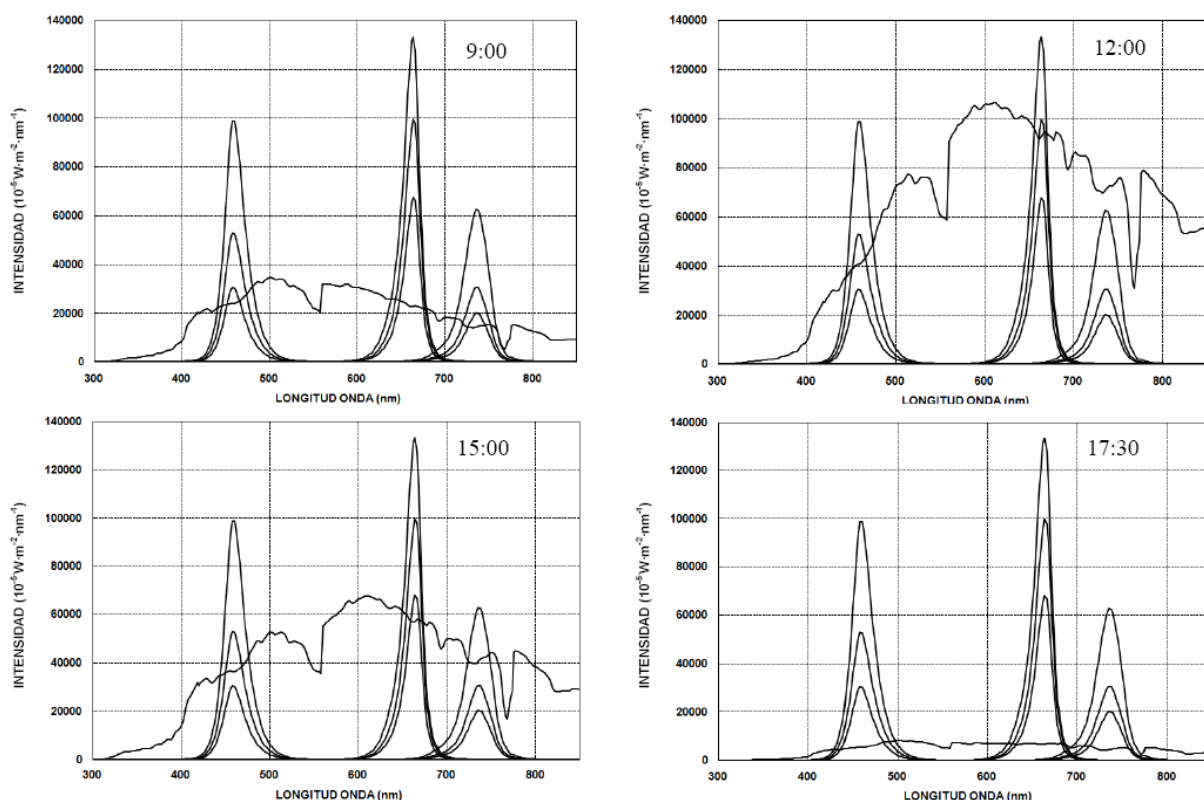


FIGURA 5. Curvas de distribución espectral de la radiación solar, medidas a cuatro horas del día (9:00, 12:00, 15:00 y 17:30 h), y de los LEDs, medidas a tres alturas de separación de las líneas de cultivo (10, 20 y 30 cm). Entre 400-550 nm se encuentra el espectro de luz del azul, entre 560-740 nm el de la luz del rojo cercano y entre 620-820 nm el de la luz del rojo lejano.

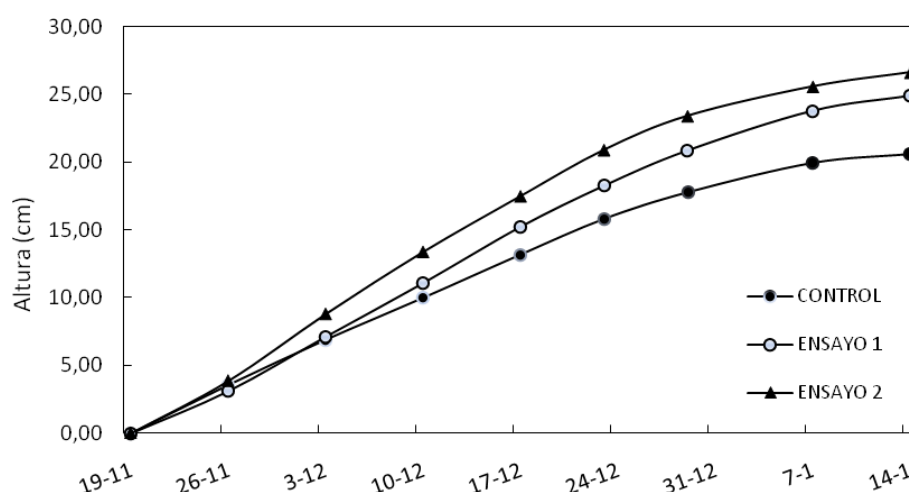


FIGURA 6. Crecimiento semanal en altura de los cormos de azafrán: dd-mm, día y mes.

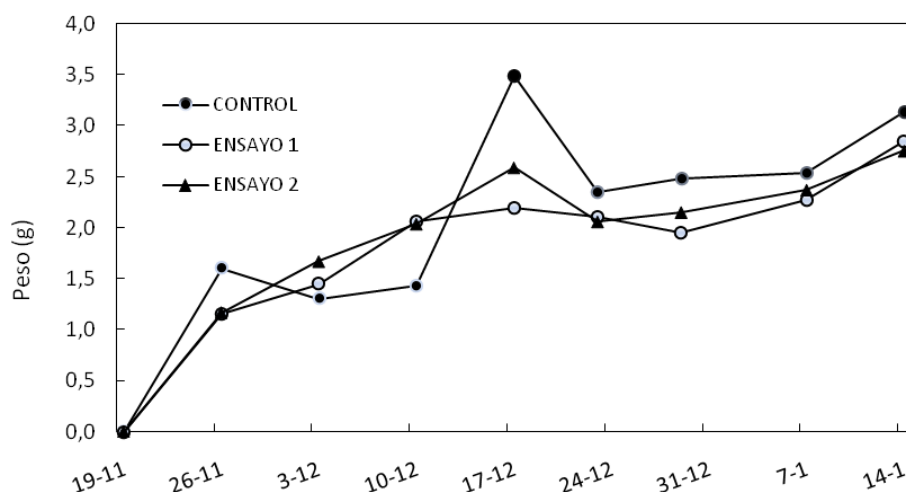


FIGURA 7. Crecimiento semanal en masa de los cormos de azafrán: dd-mm, día y mes.

CONCLUSIONES

El cultivo de azafrán (*Crocus sativus* L.) en hidroponía es completamente viable. La utilización de LEDs para la irradiación de azafrán en hidroponía es una experiencia totalmente innovadora que no se ha realizado nunca hasta ahora en España y muy probablemente tampoco en el extranjero.

Los cormos irradiados con luz artificial LEDs, tienden a crecer más rápido y a acumular más sustancias de reserva que los cormos iluminados naturalmente.

Entre los ensayos realizados con LEDs, los cormos irradiados con mayor luz azul muestran un mayor crecimiento que los cormos irradiados con mayor luz roja. Aunque no hay diferencias significativas ($p = 0.05$) ni en peso ni en longitud, son los cormos bajo luz roja los que acumulan más sustancias de reserva puesto que su longitud es inferior a los cormos bajo luz azul y el peso de ambos es similar.

Por su parte, mientras que los LEDs (que son fuentes puntuales para fabricar obleas de semiconductores relativamente pequeñas) actúan como fuentes concentradas de luz brillante, los OLEDs pueden ser configurados como de mayor área, fuentes de luz más difusa que se puede hacer en grandes hojas de vidrio o en un proceso de *roll to roll*, lo que permite importantes economías en la fabricación. Como consecuencia de ello, los OLEDs puede ser más adecuado para la iluminación de vegetales y, si se fabrican materiales de sustrato flexible, son capaces de ajustarse a diversas formas y podrían integrarse más estrechamente en los diseños del equipamiento de grandes invernaderos, en concreto de las mallas térmicas. Los productos comerciales OLED-SSL más prometedores son los de las firmas Ledón, Kanaka y Novaled. Los investigadores han hecho rápidos progresos en la mejora de la eficiencia de la luz OLED, alcanzando más de 150 lm/W en 2009. Aunque la vida útil de los OLEDs se espera que sea más corta que los LED (20.000 h en lugar de 50.000 h), el primer costo de los OLEDs será similar a la de los LEDs a largo plazo, debido a la capacidad prevista para la fabricación en continuo de paneles OLEDs. Por último, la iluminación OLED pueden utilizar menos energía y ofrecer la misma calidad de luz o mejor que otras tecnologías de iluminación alternativa.

Es claro que hasta el momento para producir sistemas eficientes OLED para la iluminación de invernaderos se precisa de muchísima investigación sobre los productos comercializados existentes. Los prototipos LUREONTM and Kanaka son los más prometedores, pero para la iluminación de invernaderos se necesita dar respuesta a otras preguntas: ¿Es posible ganar en eficiencia generalizada de más de 100 lm/W? ¿Qué porcentaje de azul y de la luz roja es la más adecuada para los diferentes cultivos (cormos de

azafrán en nuestro caso de estudio)? ¿Qué pasa con el efecto de otros colores, UV e IR?, ¿Debería la luz ser pulsada?, ¿Debería ser atenuada por la mañana y por la noche, para imitar las condiciones naturales (amanecer y atardecer)?. Las preguntas anteriores permanecen sin resolver.

En relación con la tecnología OLED, nuestro equipo de investigación tiene como objetivos principales los siguientes: (1) el desarrollo de prototipos OLED de IR y rojo, utilizando nuevos complejos de erbio (III) como emisores (los primeros constituyen una de las principales potencialidades inexploradas de la tecnología OLED), (2) aumentar la eficiencia de prototipos OLED verde con complejos de iridio (III) y nuevas capas cátodo; (3) ofrecer nuestra colaboración a las empresas comerciales a través de un sistema de *joint-venture*, y (4) ensayar nuestros dos prototipos y productos disponibles en el mercado para crecer azafrán y otros cultivos.

REFERENCIAS

- HOENECKE, M.E.; BULA, R.J.; TIBBITS, T.W. Importance of “Blue” photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. *HortScience*, 27: 427–430. 1992.
- INTERREG III. El Libro Blanco del Sector Europeo del Azafrán. www.europeansaffron.eu. 2006.
- KIM, S.; HAHN, E.; HEO, J.; PAEK, K. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro. *Scientia Horticulturae*, 101: 143–151. 2004.
- NHUT, D.T.; TAKAMURA, N.T.; WATANABE, H.; TANAKA, M. Light emitting diodes (LEDs) as a radiation source for micropropagation of strawberry. *In: Transplant production in the 21st century: Proceedings of the International Symposium on Transplant Production in Closed System for Solving the Global Issues on Environmental Conservation, Food, Resources and Energy*. Springer-Verlag, New York, pp. 114–118. 2000.
- OKAMOTO, K.; YANAGI, T.; KONDO, S. Growth and morphogenesis of lettuce seedlings raised under different combinations of red and blue light. *Acta Horticulturae*, 435: 149–157. 1997.
- OYAERT, E.; VOLCKAERT, H.; DEBERGH, P.C. Growth of chrysanthemum under coloured plastic films with different light qualities and quantities. *Scientia Horticulturae*, 79: 195–205. 1999.
- PÉREZ-BUENO, M. Azafrán. Cultivo, Enfermedades, Rendimientos, Industrialización. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 167 p, ISBN: 8471145782. 1995.
- SHIMIZU, H.; MA, Z.; TAZAWA, S.; DOUZONO, M.; RUNKLE, E.S.; HEINS, R.D. Blue light inhibits stem elongation of Chrysanthemum. *Acta Horticulturae*, 711: 363–368. 2006.
- TENNESSEN, D.J.; SINGSAAS, E.L.; SHARKEY, T.D. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research. *Photosynthesis Research*, 39: 85–92. 1994.